

Д. ф.-м. н. А. С. ГАРКАВЕНКО¹, д. т. н. В. А. МОКРИЦКИЙ²,
к. т. н. О. В. БАНЗАК³, к. т. н. В. А. ЗАВАДСКИЙ⁴

¹Германия, г. Корнвестхайм, Фирма «Гайстескрафт»;

Украина, ²Одесский национальный политехнический университет; ³Одесская национальная академия связи имени А.С. Попова; ⁴Одесская национальная морская академия

E-mail: garks@arcor.de; mokrickiy@mail.ru

ИОНИЗАЦИОННЫЙ ОТЖИГ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ. ЧАСТЬ ВТОРАЯ: ЭКСПЕРИМЕНТ

При облучении полупроводниковых кристаллов мощными (сильноточными) импульсными электронными пучками высоких энергий обнаружен новый вид отжига, названный авторами ионизационным. В данной статье описаны экспериментальные исследования, подтверждающие сделанное ранее теоретическое обоснование.

Ключевые слова: лазер, отжиг, электронный пучок.

До проведения исследований [1–3] существовало общепринятое представление, что облучение полупроводниковых кристаллов электронами высоких энергий (более 300 кэВ) приводит к значительному и необратимому ухудшению их электрофизических, оптических и структурных свойств [4, 5]. Действительно, в результате такого облучения в структуре полупроводниковых кристаллов возникают дефекты, которые в запрещенной зоне образуют ряд новых глубоких уровней и в свою очередь захватывают равновесные и неравновесные носители заряда. Вследствие этого концентрация и подвижность носителей уменьшаются, увеличивается сопротивление материала, уменьшается квантовый выход излучательной рекомбинации. Для облучения полупроводников обычно используются слаботочные ускорители электронов с непрерывным потоком, плотность тока в которых составляет $10^{-5}–10^{-6}$ А/см², энергия 0,3–1 МэВ. Все изменения свойств после такого облучения сохраняются при комнатной температуре, а заметное восстановление свойств до исходных значений наблюдается только после длительного нагревания кристаллов до высокой температуры. Например, в случае GaAs температура отжига дефектов составляет около 400°C [6].

В отличие от этого, в [1–3] наблюдалось улучшение структурных свойств полупроводниковых кристаллов (отжиг дефектов) при их облучении мощными (сильноточными) импульсными электронными пучками высоких энергий, и в [7] нами было приведено теоретическое обоснование этого эффекта. Настоящая статья посвящена описанию экспериментальных исследований влияния сильноточных импульсных электронных пучков на оптическую однородность полупроводниковых кристаллов GaAs и CdS, подтверждающих выдвинутую в [7] теорию.

Условия эксперимента

Исследовали массивные монокристаллы сульфида кадмия *n*-типа проводимости, выращенные методом сублимации в равновесных условиях или в условиях избытка паров серы или кадмия. Образцы арсенида галлия *n*- и *p*-типа получали методом жидкофазной эпитаксии в поле гамма-излучения или вырезали из массивных слитков вдоль оси их роста в виде плоскопараллельных пластин и полировали с обеих сторон (клиновидность пластин была не хуже 10''–20''). После этого поверхность образцов очищалась бомбардировкой ионами аргона с энергией около 20 кэВ в вакууме 10^{-8} Торр при температуре 200°C.

Толщину пластин (около 1 мм) выбирали с учетом того, что при ее увеличении уменьшается пропускание образца за счет увеличения поглощения и увеличиваются углы рассеяния лазерного излучения, обусловленного оптическими неоднородностями. Толщину образцов измеряли с помощью вертикального интерферометрического оптиметра (типа ИКВ) с набором оптических измерительных головок, обеспечивающих погрешность измерения не хуже 0,1–0,2 мкм.

В табл. 1 приведены параметры исследуемых образцов (N – равновесная концентрация носителей заряда, μ – подвижность, ρ – удельное сопротивление, Δn – разница между значениями показателя преломления образца и оптически однородного кристалла, N_d – плотность дислокаций, τ – время жизни излучательной рекомбинации неравновесных носителей заряда, его измеряли по методике, описанной в [8]).

Для облучения образцов использовался ускоритель ЭЛИТ-2 в импульсном режиме со следующими параметрами: энергия электронов $E_0 = 0,3–1$ МэВ, длительность импульса тока $t = 0,1–10$ нс, частота повторения импульсов $\Omega = 1–10$ Гц, плотность тока пучка $j = 20–300$ А/см² при его диаметре 8 мм.

Электрофизические и оптические свойства образцов до облучения

№ образца	Материал образца	Δn	ρ , Ом·см	N , см ⁻³	μ , см ² /(В·с)	N_d , см ⁻²	τ , с
1	<i>n</i> -GaAs	$6,52 \cdot 10^{-4}$	$2,20 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{18}$	6351	$1,5 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^{-9}$
2	<i>n</i> -GaAs	$5,74 \cdot 10^{-4}$	$1,51 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{19}$	5523	$2,3 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^{-9}$
3	<i>p</i> -GaAs	$8,41 \cdot 10^{-5}$	$4,55 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \cdot 10^{17}$	7634	$2,1 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^{-9}$
4	<i>n</i> -CdS	$4,51 \cdot 10^{-6}$	$3,70 \cdot 10^4$	$5,3 \cdot 10^{13}$	928	$7,3 \cdot 10^4$	$4,4 \cdot 10^{-9}$
5	<i>n</i> -CdS	$1,42 \cdot 10^{-6}$	$2,58 \cdot 10^3$	$7,9 \cdot 10^{15}$	419	$6,6 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^{-9}$
6	<i>n</i> -CdS	$3,53 \cdot 10^{-3}$	$1,20 \cdot 10^5$	$1,9 \cdot 10^{14}$	521	$4,3 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^{-9}$
7	<i>n</i> -CdS	$5,33 \cdot 10^{-5}$	$2,47 \cdot 10^3$	$2,08 \cdot 10^{14}$	532	$3,5 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^{-9}$

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Образцы GaAs были подвергнуты облучению при комнатной температуре ($T = 300$ К) импульсным электронным пучком с $j = 200 - 300$ А/см², $E_0 = 1$ МэВ, $t = 0,1 - 10$ нс и $\Omega = 10$ Гц. После этого проводились их электрофизические и оптические исследования, результаты которых приведены в табл. 2.

В кристаллах, обладающих проводимостью *n*-типа, изменение концентрации и подвижности носителей заряда было незначительным. Глубоких уровней, наблюдаемых обычно в арсениде галлия после таких больших доз облучения, выявлено не было. Скорость удаления электронов K была на два-три порядка меньше, чем в ранее известных случаях [4], и составляла $10^{-1} - 10^{-2}$ см⁻¹ ($K = \Delta N / \Phi$, где ΔN — концентрация неравновесных носителей заряда, возникающих при облучении образца возбуждающим

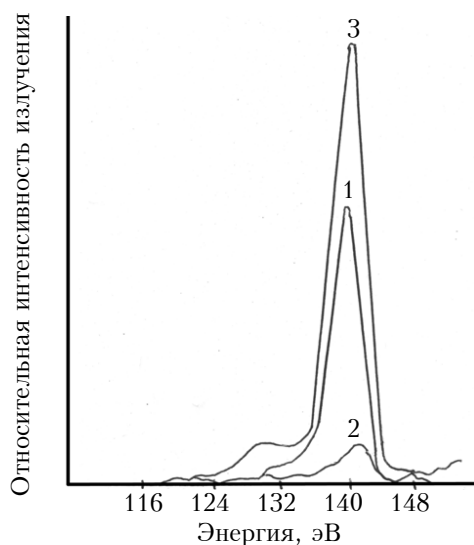
электронным пучком; Φ — интегральный поток (доза), флюенс электронов). Свойства кристаллов *p*-типа также изменялись слабо, однако скорость удаления дырок в них была больше — $0,3$ см⁻¹, что обусловлено различным уровнем легирования образцов *n*- и *p*-типа. Незначительное изменение электрофизических свойств исследованных образцов обоих типов проводимости, очевидно, связано с тем, что большая часть радиационных дефектов, которые возникают в кристаллах в процессе облучения, успевает отжечься за время импульса.

Наряду с этим оказалось, что после интенсивного облучения импульсным электронным пучком малой длительности существенно улучшились параметры катодолюминесценции (см. рисунок) и уменьшилось время жизни τ излучательной рекомбинации неравновесных носителей. Также улучшились структурные свойства исследуемого материала, что подтверждается исследовани-

Таблица 2

Электрофизические и оптические свойства образцов после их облучения импульсным электронным пучком

№ образца	Материал образца	Δn	ΔK	ΔN , см ⁻³	N , см ⁻³	μ , см ² /(В·с)	τ , с	$\Delta N / N$, %
1	<i>n</i> -GaAs	$1,20 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$0,1 \cdot 10^{18}$	$1,1 \cdot 10^{18}$	6532	$2,3 \cdot 10^{-9}$	0,09
2	<i>n</i> -GaAs	$2,10 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$0,2 \cdot 10^{19}$	$1,3 \cdot 10^{19}$	5727	$3,8 \cdot 10^{-9}$	0,15
3	<i>p</i> -GaAs	$7,50 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$0,1 \cdot 10^{17}$	$1,2 \cdot 10^{17}$	7841	$1,5 \cdot 10^{-9}$	0,08
4	<i>n</i> -CdS	$2,95 \cdot 10^{-6}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{13}$	$5,1 \cdot 10^{13}$	1000	$3,3 \cdot 10^{-9}$	0,01
5	<i>n</i> -CdS	$0,24 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{15}$	$6,4 \cdot 10^{15}$	449	$2,1 \cdot 10^{-9}$	0,23
6	<i>n</i> -CdS	$2,80 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{14}$	$1,3 \cdot 10^{14}$	553	$4,7 \cdot 10^{-9}$	0,46
7	<i>n</i> -CdS	$2,45 \cdot 10^{-6}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{15}$	$4,2 \cdot 10^{15}$	500	$3,1 \cdot 10^{-9}$	0,30



Спектры катодолюминесценции, полученные при $T = 300$ К, для образцов n -GaAs с $N = 1,2 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$ до (1) и после (2, 3) облучения: 2 — непрерывное облучение ($\Phi = 1,5 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$, $j = 10^{-6}$ А/см 2 , $E_0 = 800$ кэВ); 3 — импульсное облучение ($\Phi = 8 \cdot 10^{18}$ см $^{-2}$, $j = 50$ А/см 2 , $E_0 = 800$ кэВ)

ем оптической неоднородности, связанной с рассеянием и поглощением излучения на дефектах структуры (изменение показателей преломления Δn и поглощения ΔK). Измерения проводились по методике, приведенной в [8].

Поскольку полученные экспериментальные результаты отличались от данных других работ [3, 9, 10], согласно которым облучение GaAs электронами высоких энергий приводит к существенным необратимым изменениям электрофизических и оптических свойств, были проведены контрольные исследования: кристаллы GaAs облучали пучком электронов с плотностью тока $j = 1$ мкА/см 2 и энергией $E = 1$ МэВ на слаботочном ускорителе «Электроника ЭЛУ-4» при комнатной температуре. Образцы были вырезаны из тех же слитков и приготовлены тем же самым образом, что и для облучения на ускорителе ЭЛИТ-2. После облучения дозой $10^{16} - 10^{17}$ см $^{-2}$, что на порядок меньше, чем на ускорителе ЭЛИТ-2, подвижность и концентрация носителей заряда резко уменьшились как у нелегированных, так и у легированных кристаллов. Скорость удаления носителей была велика и при дозе $2 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$ составляла $3,5$ см $^{-1}$ у легированных образцов. Были обнаружены глубокие уровни $E_c = 0,02$ эВ и $E_c = 0,09$ эВ, наблюдаемые обычно при облучении таких структур. Подобно кристаллам с большим количеством дефектов, резко уменьшилась интенсивность катодолюминесценции (кривая 2 на рисунке). Хранение облученных образцов при комнатной температуре в течение нескольких дней не привело к каким-либо заметным изменениям их электрофизических и люминесцентных свойств.

Результаты контрольного исследования свидетельствуют о достоверности результатов облуче-

ния образцов сильноточными импульсными пучками, поскольку при слаботочном облучении таких же кристаллов их характеристики изменялись так, как и в других известных работах.

Обнаруженное улучшение свойств GaAs после облучения мощным импульсным потоком электронов высоких энергий можно, вероятно, объяснить следующим образом. В результате такого облучения резко возрастает плотность электронно-дырочной плазмы ($10^{19} - 10^{20}$ см $^{-3}$), что обуславливает такие коллективные явления в кристалле, как экранирование электронно-дырочным облаком пар Френкеля (исходных и возникающих в процессе облучения) и экранирование валентных связей. Это, в свою очередь, приводит к резкому увеличению подвижности атомов решетки и к «залечиванию» точечных дефектов, т. е. к эффективному отжигу, что значительно улучшает структуру и оптическую однородность кристалла и находится в хорошем соответствии с теоретическим обоснованием процесса [1].

При облучении кристалла контролировалось его нагревание на протяжении импульса (по сдвигу длины волны катодолюминесценции, а также по фазовому сдвигу лазерного излучения, отраженного от исследуемого образца [11, 12]). Было установлено, что кристалл нагревается незначительно: на $80 - 100^\circ\text{C}$ при длительности импульса 10 нс и на $8 - 10^\circ\text{C}$ при длительности 1 нс. То есть, обнаруженный вид отжига является нетермическим и поэтому назван ионизационным.

В тех же условиях изучали кристаллы CdS. В них также было обнаружено улучшение электрофизических и оптических свойств (см. табл. 2). При этом, однако, механизм импульсного отжига в них, по-видимому, не такой, как в GaAs. Дело в том, что прочность кристаллической решетки CdS меньше, чем у GaAs, и это облегчает полиморфные превращения при невысоких сдвиговых напряжениях. Фазовый переход из основной гексагональной модификации с решеткой типа вюрцит в кубическую типа сфалерит (α -CdS \rightarrow β -CdS) может быть стимулирован термоупругими напряжениями, которые при кратковременном воздействии мощных электронных пучков ($\Delta N = 10^{19} - 10^{20}$ см $^{-3}$) достигают значений $(1 - 2) \cdot 10^7$ Н/м 2 , достаточных для начала процесса полиморфного превращения [13]. Результаты экспериментов показали, что в кристаллах CdS, толщина которых сравнима с глубиной проникновения электронов, произошли указанные фазовые переходы из α - в β -модификацию [13], что свидетельствует об ионизационном механизме отжига [3].

Теоретические оценки влияния интенсивного облучения на полупроводниковые материалы, описанные в [3, 7, 14, 15], хорошо согласуются с полученными экспериментальными данными и позволяют допустить, что обнаруженные свойства кристаллов GaAs и CdS, облученных пучками быстрых электронов большой плотности, связаны собственно с высокой интенсив-

ностью электронного пучка. Так, при комнатной температуре при энергии возбуждающих электронов $E_0 = 700$ кэВ и плотности тока $j = 50$ А/см² скорость генерации электронно-дырочных пар в единице объема исследованных образцов составляет около 10^{28} см⁻³·с⁻¹, $\Delta N = 10^{19} - 10^{20}$ см⁻³, $\tau \approx 10^{-9}$, что на 8 порядков больше, чем при облучении на слаботочном ускорителе при $j = 10^{-6}$ А/см². Также после такого облучения на 10 порядков становится выше скорость введения радиационных дефектов Френкеля, а их мгновенная плотность за время одного импульса составляет около 10^{17} см⁻³. При облучении на слаботочном ускорителе за то же время плотность возникающих дефектов составляет примерно 10^7 см⁻³.

В случае облучения образцов электронами с энергией $E_0 = 1$ МэВ и током $j = 100$ А/см² в течение 1 нс первичными дефектами в них являются неравновесные пары Френкеля. Вероятность протекания реакций аннигиляции или диссоциации такой пары зависит от энергии и импульса возникающей в процессе облучения неравновесной электронно-дырочной плазмы. Высокий уровень ионизации может изменить скорость такой реакции вследствие взаимодействия электронов и дырок не только друг с другом, но и с неравновесными дефектами [7]. При этом, как подтвердили представленные выше результаты экспериментов, происходит их эффективный отжиг. Вероятность возникновения устойчивого дефекта, обычно наблюдаемого при облучении на слаботочном ускорителе, при интенсивном облучении уменьшается до нуля. Высокий уровень ионизации может изменить зарядовое состояние не только радиационных дефектов, но и других несовершенств кристаллической решетки. Вследствие этого возможно изменение скорости различных реакций, которые протекают в облученном кристалле между радиационными дефектами и исходными нарушениями или примесями, поскольку сечение захвата дефекта этими нарушениями зависит от их зарядового состояния.

То обстоятельство, что наблюдаемые изменения свойств GaAs слабо зависят от типа проводимости, подчеркивает, что эти изменения определяются не исходной равновесной концентрацией носителей, а высоким уровнем возбуждения электронно-дырочных пар. Улучшение однородности материала в результате влияния радиации говорит о том, что в условиях облучения импульсным электронным пучком высокой интенсивности примесные атомы или более сложные комплексы (примесный атом + радиационный дефект) способны перемещаться по кристаллу. Сегодня существует ряд убедительных доказательств того, что изменение зарядового состояния примесных атомов увеличивает скорость их диффузии. Это приводит к заметному перемещению примесных атомов по кристаллу [6]. Поскольку диффузионная длина неравновесных носителей составляет 0,2–1 мкм и они могут перемещаться на рассто-

яния в сотни постоянных решетки, а расстояние между примесями и дефектами при их концентрации $10^{18} - 10^{19}$ см⁻³ составляет 10–15 постоянных решетки, экранирование химических связей значительно увеличивает подвижность этих несовершенств и приводит к «залечиванию» дефектов кристаллической решетки, увеличивая ее оптическую однородность.

Следует отметить, что обнаруженное явление было использовано для создания мощных полупроводниковых лазеров [16, 17]. Так, например, у лазеров на основе образцов *n*-GaAs с концентрацией электронов $(1-3) \cdot 10^{20}$ см⁻³ минимальная пороговая плотность тока составляла 3 А/см² при 300 К и 0,8–1 А/см² при 80 К, при этом КПД был вблизи своих предельных значений: 11–15% при 300 К и 25–30% при 80 К. Мощность излучения достигала 300–400 Вт.

Заключение

Проведенные исследования указывают на то, что предложенная авторами модель качественно объясняет новые и неожиданные физические результаты, полученные при облучении кристаллов GaAs и CdS мощным импульсным пучком электронов высоких энергий. Исследования в данном направлении целесообразно продолжить с точки зрения более детального понимания сложных механизмов взаимодействия мощного импульсного потока электронов высоких энергий с веществом, а также использования обнаруженных эффектов для создания мощных полупроводниковых лазеров.

Обнаруженное значительное улучшение свойств полупроводниковых соединений GaAs и CdS после облучения интенсивным импульсным пучком быстрых электронов является принципиально новым явлением. Оно расширяет существующие представления о взаимодействии потоков заряженных частиц высокой плотности и энергии с твердыми телами, в корне изменяет ранее установившиеся представления о том, что это взаимодействие необратимо ухудшает свойства полупроводниковых кристаллов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Гаркавенко О. С., Ленков С. В., Мокрицкий В. А., Пашков А. С. Напівпровідникові лазери з електронним накачуванням. Т. 1. Механізм генерації. Властивості випромінювання. — Одеса: Поліграф, 2006.
2. Гаркавенко О. С., Ленков С. В., Мокрицкий В. А., Відолоб В. В. Напівпровідникові лазери з електронним накачуванням. Т. 2. Активні середовища. Розробка приладів. — Одеса: Поліграф, 2006.
3. Гаркавенко А. С. Радиационная модификация физических свойств широкозонных полупроводников и создание на их основе лазеров большой мощности. — Львов: ЗУКЦ, 2012.
4. Вавилов В. С., Кекелидзе Н. П., Смирнов Л. С. Действие излучений на полупроводники. — Москва: Наука, 1988.
5. Оцуки Ё.-Х. Взаимодействие заряженных частиц с твердыми телами. — Москва: Мир, 1985.

6. Матаре Г. Электроника дефектов в полупроводниках. — Москва: Мир, 1974.
7. Гаркавенко А. С., Мокрицкий В. А., Банзак О. В., Завадский В. А. Ионизационный отжиг полупроводниковых кристаллов. Часть первая: Теоретические предпосылки // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2014. — № 4. — С. 50–55. — DOI: 10.15222/TKEA2014.4.50
8. Гаркавенко А. С., Зубарев В. В., Ленков С. В. и др. Новые лазерные методы, средства и технологии. — Одесса: Астропринт, 2002.
9. Ленков С. В., Мокрицкий В. А., Перегудов Д. А., Тариелашвили Г. Т. Физико-технические основы радиационной технологии полупроводников. — Одесса: Астропринт, 2002.
10. Ленков С. В., Мокрицкий В. А., Гаркавенко А. С. и др. Радиационное управление свойствами материалов и изделий опто- и микроэлектроники. — Одесса: Друк, 2003.
11. Гаркавенко А. С., Календин В. В., Мокрицкий В. А. Измерение температуры по фазовому сдвигу лазерного излучения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — № 4'1992–№ 1'1993. — С. 50–51.
12. Гаркавенко А. С. Лазерный интерференционный метод контроля температуры твердых тел // Матер. науч.-технич. конф. «Леотест-98»: Физические методы и средства контроля материалов и изделий. — Киев–Львов. — 1998. — С. 114–117.
13. Мокрицкий В. А., Ленков С. В., Гаркавенко О. С. та ін. Аналіз механізмів відпалу лазерних кристалів CdS // Зб. наук. праць Військового інституту КНУ ім. Т. Шевченка. — 2011. — Вип. 33. — С. 96–98.
14. Гаркавенко А. С., Дмитриев А. И., Календин В. В., Левинский Б. Н. О возможности измерения времени релаксации за счет электронно-дырочного рассеяния в полупроводниках при высоком уровне возбуждения // Квантовая электроника. — Киев: Наукова думка, 1989. — № 36. — С. 58–60.
15. Гаркавенко А. С., Гатало М. С., Левинский Б. Н. Расчет времени релаксации за счет электронно-дырочного рассеяния в сильно возбужденной плазме полупроводников // Физическая электроника. — 1990. — Вып. 41. — С. 46–48.
16. Гаркавенко А. С. Смена механизмов излучения в лазерах с электронной накачкой на основе оптически однородных, радиационно легированных кристаллов GaAs // Зб. наук. праць Військового інституту КНУ ім. Т. Шевченка. — 2011. — Вип. 32. — С. 15–21.
17. Гаркавенко А. С. Тонкая структура спектров лазерного излучения при электронной накачке радиационно модифицированных оптически однородных нелегированных кристаллов GaAs // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2011. — № 5. — С. 27–30.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 15.12.2013 г.*

*О. С. ГАРКАВЕНКО¹, В. А. МОКРИЦЬКИЙ²,
О. В. БАНЗАК³, В. О. ЗАВАДСЬКИЙ⁴*

¹Німеччина, м. Корнвестхайм, Фірма «Гайстескрафт»;
²Україна, Одеський національний політехнічний університет;
³Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова;
⁴Одеська національна морська академія
E-mail: garks@arcor.de; mokrickiy@mail.ru

ИОНИЗАЦИОННЫЙ ВІДПАЛ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КРИСТАЛІВ. ЧАСТИНА ДРУГА: ЕКСПЕРИМЕНТ

При опроміненні напівпровідникових кристалів потужними (сильнострумовими) імпульсними електронними пучками високих енергій виявлено новий вид відпалу, названий авторами іонізаційним. У цій статті наведено результати експериментальних досліджень, які підтверджують зроблене раніше теоретичне обґрунтування.

Ключові слова: лазер, відпал, електронний пучок.

DOI: 10.15222/TKEA2014.2.51
UDC 535.14:621.365.826

*A. S. GARKAVENKO¹, V. A. MOKRITSKIY²,
O. V. BANZAK³, V. A. ZAVADSKIY⁴*

¹Germany, Kornwestheim, Wissenschaftliche Vereinigung «Geisteskraft»;
²Ukraine, Odessa National Polytechnic University;
³A. S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications;
⁴Odessa National Maritime Academy

E-mail: garks@arcor.de; mokrickiy@mail.ru

IONIZATION ANNEALING OF SEMICONDUCTOR CRYSTALS. PART TWO: THE EXPERIMENT

There is a conception that irradiation of semiconductor crystals with high energy electrons (300 keV) results in a significant and irreversible deterioration of their electrical, optical and structural properties.

Semiconductors are typically irradiated by low voltage electron accelerators with a continuous flow, the current density in such accelerators is $10^{-5} - 10^{-6}$ A/cm², the energy – 0,3–1 MeV. All changes in the properties after such irradiation are resistant at room temperature, and marked properties recovery to baseline values is observed only after prolonged heating of the crystals to a high temperature. In contrast, the authors in their studies observe an improvement of the structural properties of semiconductor crystals (annealing of defects) under irradiation with powerful (high current) pulsed electron beams of high energy ($E_0 = 0,3^{-1}$ MeV, $t = 0,1 - 10$ ns, $\Omega = 1 - 10$ Hz, $j = 20 - 300$ A/cm²). In their previous paper, the authors presented theoretical basis of this effect. This article describes an experimental study on the influence of high-current pulsed electron beams on the optical homogeneity of semiconductor GaAs and CdS crystals, confirming the theory put forward earlier.

Keywords: laser, annealing, electron beam.

REFERENCES

- Garkavenko O. S., Lyenkov S. V., Mokritskii V. A., Pashkov A. S. *Napivprovidnikovi lazери z elektronnim nakachuvannyam. Vol. 1. Mekhanizm generatsiyi. Vlastivosti viprominyuvannya* [Semiconductor laser with electronic pumping. Volume 1. The mechanism of generation. Properties of radiation]. Odesa, Poligraf, 2006, 434 p. (in Ukrainian)
- Garkavenko O. S., Lyenkov S. V., Mokritskii V. A., Vidolob V. V. *Napivprovidnikovi lazери z elektronnim nakachuvannyam. Vol. 2. Aktivni seredovishcha. Rozrobka priladiv* [Semiconductor laser with electronic pumping. Vol. 2. The active environment. Development of devices]. Odesa, Poligraf, 2006, 434 p. (in Ukrainian)
- Garkavenko A. S. *Radiatsionnaya modifikatsiya fizicheskikh svoystv shirokozonnnykh poluprovodnikov i sozdanie na ikh osnove lazerov bol'shoi moshchnosti* [Radiation modification of the physical properties of wide bandgap semiconductors and creation on their basis of high-power lasers]. Lvov, ZUKTs, 2012, 258 p. (in Russian)
- Vavilov V. S., Kekelidze N. P., Smirnov L. S. *Deistvie izlucheniya na poluprovodniki* [Effect of radiation on semiconductors]. Moscow, Nauka, 1988, 173 p. (in Russian)
- Ohtsuki Yoshi-Hiko. *Charged beam interaction with solids*. USA, Canada, Taylor & Francis, 1983, 248 p.
- Matore H. F. *Defect electronics in semiconductors*. John Wiley & Sons Inc., 1971, 627 p.
- Garkavenko A. S., Mokritskii V. A., Banzak O. V., Zavadskii V. A. Ionization annealing of semiconductor crystals. Part one: theoretical background. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2014, no 4, pp. 50-55. DOI: 10.15222/TKEA2014.4.50 (in Russian)
- Garkavenko A. S., Zubarev V. V., Lenkov S. V. et al. *Novye lazernye metody, sredstva i tekhnologii* [New laser techniques, equipment and technologies]. Odessa, Astroprint, 2002, 280 p. (in Russian)
- Lenkov S. V., Mokritskii V. A., Peregodov D. A., Tarielashvili G. T. *Fiziko-tekhmicheskie osnovy radiatsionnoi tekhnologii poluprovodnikov* [Physical and technical bases of semiconductors radiation technology]. Odessa, Astroprint, 2002, 296 p. (in Russian)
- Lenkov S. V., Mokritskii V. A., Garkavenko A. S. et al. *Radiatsionnoye upravleniye svoystvami materialov i izdelii optiki i mikroelektroniki* [Radiation properties control of materials and products of opto- and microelectronics]. Odessa, Druk, 2003, 345 p. (in Russian)
- Garkavenko A. S., Kalendin V. V., Mokritskii V. A. [Temperature measurement via phase shift of laser radiation] *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, no 4'1992 – 1'1993, pp. 50-51 (in Russian)
- Garkavenko A. S. [The laser interference method of temperature control of solids] *Mater. of scientific-tech. conf. "Leotest-98": Physical methods and control of materials and products*. Kiev, Lvov, 1998, pp. 114-117. (in Russian)
- Mokritskii V.A., Lenkov S.V., Garkavenko O.S., Zavadskii V.A., Banzak O.V. [Analysis of the mechanisms of laser annealing CdS crystals] *Collection of Scientific Papers of the Military Institute*, Ukraine, Kiev, 2011, iss. 33, pp. 96-98. (in Ukrainian)
- Garkavenko A. S., Dmitriev A. I., Kalendin V. V., Levinskii B. N. [About possibility of measuring the relaxation time due to electron-hole scattering in semiconductors at high excitation level] *Kvantovaya elektronika*, Kiev, Naukova dumka, 1989, iss. 36, pp. 58-60. (in Russian)
- Garkavenko A. S., Gatalo M. S., Levinskii B. N. [Calculation of the relaxation time due to electron-hole scattering in highly excited plasma in semiconductors]. *Fizicheskaya elektronika*, 1990, iss. 41, pp. 46-48. (in Russian)
- Garkavenko A. S. [Change of emission mechanisms in e-pumped lasers based on optically homogeneous, radiation-doped GaAs crystals]. *Collection of Scientific Papers of the Military Institute*, Ukraine, Kiev, iss. 32, pp. 15-21. (in Russian)
- Garkavenko A. S. [Fine structure of laser spectrum at electron-beam pumping based on radiation-modified optically homogeneous crystals of undoped GaAs]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2011, no 5, pp. 27- 30. (in Russian)